

УДК 551.83 (571.56)

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ ПЛАГИОКЛАЗА НА ЗАПАДНОМ ФЛАНГЕ ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

**Иван Олегович Крылов¹✉, Иван Иванович Никулин², Алексей Андреевич
Самсонов³, Дмитрий Михайлович Коршунов⁴, Дамир Ильдарович Вильданов⁵**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ikrylov46@gmail.com✉

² ООО «Норильскгеология», Санкт-Петербург, Россия; nikulinII@nornik.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru✉

⁴ Геологический институт РАН, Москва, Россия; dmit0korsh@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; damwill@yandex.ru

Аннотация. Исследованы плахиоклазы габброидов Хараэлахской интрузии на западном фланге Октябрьского месторождения методом инфракрасной спектроскопии. Анализ 130 Фурье ИК-спектров поглощения плахиоклазов указывает на закономерную смену состава в изоморфном ряде от андезина ($1150, 1096 \text{ см}^{-1}$) до анортита ($1142, 1275 \text{ см}^{-1}$) в зависимости от степени дифференциации пород в интрузии. Данные ИК-спектроскопии заверялись контрольными определениями химического состава методом рентгеноспектрального микроанализа. Фурье ИК-спектры указывают на приуроченность андезина к оливинсодержащим и оливиновым габбро-долеритам. Анортит равномерно распространен в габбро-долеритах, но преобладает в лейкоократовых габбро. Анализ Фурье ИК-спектров позволил определить в структуре среди примесей железо и калий. В породах, приуроченных непосредственно к интервалам развития рудной вкрашенной минерализации (халькопиритовая, пирротиновая и пентландитовая), среди элементов-примесей в плахиоклазах отмечено Fe^{3+} , регистрируемое в пикритовых габбро-долеритах в структуре плахиоклазов по полосам поглощения $1580-1644 \text{ см}^{-1}$. Совокупность полученных новых данных имеет важное минералогическое значение. Выявленные закономерности распределения регистрируемых элементов-примесей в разрезе рудных и безрудных дифференциатов рекомендуются для применения в практике геологоразведочных работ.

Ключевые слова: инфракрасная спектроскопия, плахиоклазы, Октябрьское месторождение, Норильская металлогеническая провинция

Для цитирования: Крылов И.О., Никулин И.И., Самсонов А.А., Коршунов Д.М., Вильданов Д.И. Новые данные о составе плахиоклаза на западном фланге Октябрьского месторождения по данным инфракрасной спектроскопии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 2. С. 27–39.

NEW DATA ON THE COMPOSITION OF PLAGIOLASE ON THE WESTERN FLANK OF THE OKTYABRSKY DEPOSIT ACCORDING TO INFRARED SPECTROSCOPY

**Ivan O. Krylov¹✉, Ivan I. Nikulin, Alexey A. Samsonov³, Dmitry M. Korshunov⁴,
Damir I. Vildanov⁵**

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ikrylov46@gmail.com✉

² “Norilskgeologiya”, St. Petersburg, Russia; nikulinII@nornik.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru

⁴ Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; dmit0korsh@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; damwill@yandex.ru

Abstract. The plagioclases of the Kharaelakh intrusion on the western part of the Oktyabrsky deposit were analyzed by infrared spectroscopy. Analysis of 130 Fourier-IR absorption spectra of plagioclases with selective verification of their chemical composition by X-ray spectral microanalysis indicates a regular change in the isomorphic series from albite ($1150, 1096 \text{ cm}^{-1}$) to anorthite ($1142, 1275 \text{ cm}^{-1}$), depending on the degree of differentiation of rocks in the intrusion. According to Fourier-IR spectroscopy, albite is confined to olivine-containing and olivine gabbro-dolerites. Anorthite is evenly distributed in gabbro-dolerites, but predominates in leucocratic gabbro. Among the impurity elements in the structure of the mineral, Fe^{3+} is noted at peaks of $1580-1644 \text{ cm}^{-1}$ in picrite gabbro-dolerites, where ore interspersed mineralization of chalcopyrite, pyrrhotite, and pentlandite is directly developed. In addition to iron impurities, aluminum, potassium, barium, and strontium are also characteristic impurities in plagioclases. The totality of the data used in the section of the intrusion increases the indicative value of plagioclases and can be recommended as an additional mineral criterion of ore content.

Keywords: infrared spectroscopy, plagioclases, Oktyabrskoye ore field, Norilsk metallogenic province.

For citation: Krylov I.O., Nikulin I.I., Samsonov A.A., Korshunov D.M., Vildanov D.I. New data on the composition of plagioclase on the western flank of the Oktyabrsky deposit according to infrared spectroscopy data. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 2: 27–39 (In Russ.).

Введение. Инфракрасная спектроскопия (ИКС) — один из ведущих методов лабораторного исследования минерального вещества. Экспериментальный результат в ИКС заключается в инфракрасном спектре, который представляет собой функцию зависимости интенсивности пропущенного инфракрасного излучения от частоты. Каждый ИК-спектр индивидуален и может использоваться для идентификации минерала и его кристаллохимических особенностей. Поскольку каждое вещество представлено уникальной комбинацией молекул, теоретически не существует двух соединений с одинаковыми ИК-спектрами, поэтому ИКС позволяет проводить идентификацию веществ разнообразного состава и агрегатного состояния. К преимуществам метода Фурье ИК-спектроскопии также относится оперативность исследования.

Химические элементы-примеси в пластинах характеризуют процессы, произошедшие с магмой во время кристаллизации. Пластины в различных магматических комплексах Норильского района отличаются составом элементов-примесей, на чем должны базироваться исследования минеральных критериев рудоносности, направленные на усиление локальных геологического-поисковых работ. С целью выявления индикативных особенностей в породах Октябрьского месторождения проведена комплексная ИКС пластинах Хараэлахской интрузии с контрольной заверкой методом локального микрорентгеноспектрального анализа.

В результате многочисленных опытных работ по изучению типоморфизма пластинах выявлено увеличение в породе аортитовой составляющей, что отражает накопление элементов пластины группы (ЭПГ) и уменьшение количества сульфидов [Годлевский, 1959; Додин, Батуев, 1971; Золотухин и др., 1976]. В других исследованиях выяснено, что платинометальное оруденение сопровождается скачкообразными реверсиями состава пластины [Рябов, 1974; Рябов и др., 2001; Рябов, 1984]. В случае, когда платинометальная минерализация не сопровождается значительными вариациями состава пластины в разрезе или маркируется изменением состава интеркулумной каймы, вероятность образования промышленных скоплений ЭПГ ниже.

Материалы и методы исследования. Внутреннее строение Хараэлахского интрузива характеризуется четко выраженной расслоенностью, наиболее проявленной в его центральной и фронтальной частях. Сверху вниз выделяются: верхние контактовые призматические зернистые лейкогаббро, такситовидные, оливинсодержащие и безоливиновые габбро-долериты, оливиновые, пикритовые, сидеронитовые, такситовые и контактовые габбро-долериты [Золотухин и др., 1975]. Для выяснения особенностей состава

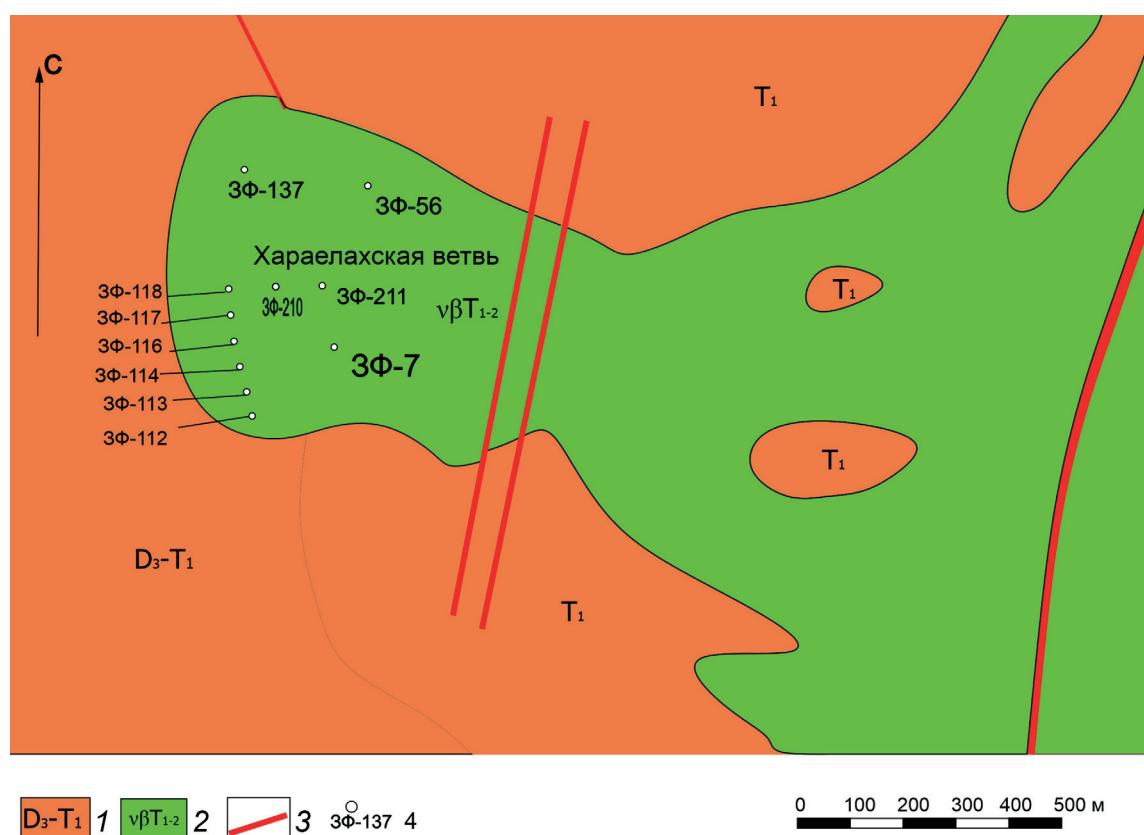
были изучены пластины из оливинсодержащих, оливиновых, такситовых и пикритовых габбро-долеритов в скважинах 3Ф-7, 3Ф-113, 3Ф-116, 3Ф-137, 3Ф-56, 3Ф-210, 3Ф-211, 3Ф-112, 3Ф-114, 3Ф-117, 3Ф-118, пробуренных на Западном фланге Октябрьского месторождения (рис. 1).

Исследование пластинах выполнено на ИК-Фурье микротоме Nicolet-380 с ИК-Фурье микротомом Centaurus (THERMO Scientific, США) и ИК-Фурье спектрометром VERTEX 70 с модулем комбинационного рассеяния RAM II в диапазоне волновых чисел 650–4000 и 400–4000 cm^{-1} соответственно в НИЦ «Курчатовский институт» (ИРЕА). Автоматизированный контроль качества и интерпретацию полученных в ходе исследований данных, а также идентификацию спектров проводили с помощью компьютерной программы OMNIC на основе международной базы данных. Химический состав определяли в зернах микрорентгеноспектральным анализом на приборе JEOL JSM-7100F с приставкой Oxford Instruments X-maxn.

Для изучения минеральных зерен использованы как их мономинеральные образцы, истертые до состояния порошка (аналитической пудры), так и плоскопараллельные пластины толщиной 0,1–0,2 мм. Породообразующие минералы габбро-долеритов разделяли в тяжелых жидкостях (тетрахлорметан с плотностью 1,59 в смеси с хлористым метиленом и чистый хлористый метилен с плотностью 3,33). После получения трех отличающихся по плотности фракций проводили выборку исследуемых зерен под бинокуляром с учетом морфологии и целостности кристаллов, а обломки исключали из выборки.

Результаты исследований и их обсуждение. В лейкократовых габбро Хараэлахского интрузива пластинах содержится в количестве до 80% от объема породы. Отмечены две генерации пластины: 1) более ранний (An_{70}) и 2) более поздний (An_{80}), редко встречается An_{100} [Геология..., 2020]. Количество пластинах в безоливиновых и оливинсодержащих габбро-долеритах составляет 50–60%. Крупные кристаллы имеют отчетливое зональное строение, их центральные части нередко замещены соссюрит-пелитовым материалом и пренитом, а каймы альбитизированы. Состав пластинах в породах этой серии изменяется в интервале от An_{10} до An_{70} , редкие зерна имеют состав до An_{80} . В краевых частях содержание аортитового минерала может понижаться до An_{42-47} [Золотухин и др., 1975; Иванов и др., 1973]. Ниже по разрезу безоливиновые и оливинсодержащие габбро-долериты сменяются оливиновыми габбро-долеритами. Пластинах в этих породах составляет 45–60% от объема породы, состав изменяется в интервале $\text{An}_{40}-\text{An}_{70}$. Их подстилают пикритовые и такситовые габбро-долериты. Они распространены только в рудоносных интрузивах

Рис. 1. Геологическая схема Хараелахской интрузии в пределах западного фланга месторождения Октябрьское:
 1 — терригенные отложения тунгусской серии; 2 — контуры интрузии;
 3 — разломы;
 4 — скважины, из которых изучены образцы



норильского типа и представляют собой их важный петрографический признак (рис. 2).

В исследованиях В.В. Рябова с соавторами [Годлевский, 1959; Золотарев, Аплонов, 2014; Леснов, 1991; Наторхин и др., 1977] отмечена положительная корреляция между основностью плагиоклазов и магнезиальностью вмещающих их горных пород, но однозначно она не устанавливается, так как изучение осложняется зональным (2 или 3 зоны) строением кристаллов. Плагиоклазы Хараелахской

интрузии характеризуются прямой зональностью с понижением количества аноритовой составляющей от центральных частей к краевым, что прослеживается и в других норильских интрузиях Норильск I и Талнахской [Золотарев, Аплонов, 2014; Геология ..., 2020] (рис. 3).

Инфракрасные спектры плагиоклазов ранее изучали многие зарубежные авторы [McKeown, 2005; Hecker, 2010; Theodosoglou, 2010]. Фурье ИК-спектры этих минералов имеют типичные по-

Таблица 1

Значения волновых чисел пиков ИКС для различных типов плагиоклазов, по [Matteson, 1993]

Тип плагиоклаза	Альбит	Олигоклаз	Андезин	Лабрадор	Битовнит	Анорит
Si-O валентные	1163					
	1144	1143	1143	1145	1146	1145
	1098	1101	1100	1095	1095	1093
Si(Al)-O валентные	1039	1036	1036		1021	1021
	1018	1013	1012	995	990	
	996			952	935	931
Si-Si валентные	788		786	759	756	757
	762	755	759			
Si-(Al)Si валентные	746					
	726	729	727			729
Al(Si)-O деформационные	650					
	611	640	643	625	624	623
	592	590	590	584	583	580
O-Si-O деформационные и M-O валентные	533	539	538	542	541	541
	476	469	470		483	484
	464				469	469
Si-O-Si деформационные	428	429	428			

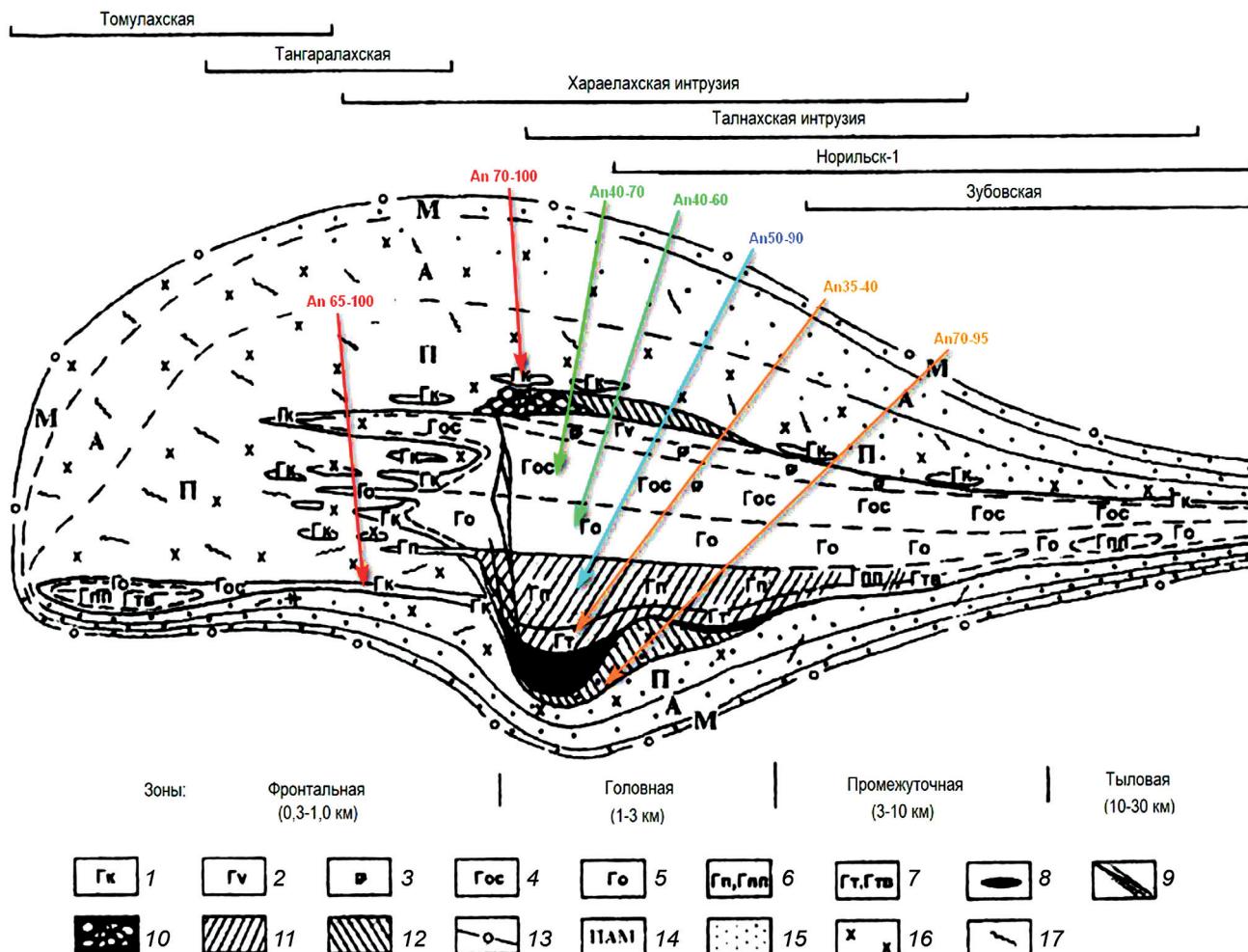


Рис. 2. Изменение типа плагиоклазов рудоносных интрузивов НМП [по Туровцеву, 2002]: интрузивные породы: 1 — контактовые габбро-долериты и долериты, 2 — гибридные метасоматические (кварцевые габбро-долериты до кварцевых габбро-диоритов и диоритов), 3 — габбро-диориты; 4—7 — габбро-долериты: 4 — оливинсодержащие и безоливиновые, 5 — оливиновые, 6 — пикритовые и пикритоподобные, 7 — тацитовые, тацитовидные; 8—12 — сульфидные руды: 8 — массивные, 9 — прожилковые, 10 — брекчиивидные, 11 — вкрапленные (в интрузивных породах), 12 — прожилково-вкрапленные (в роговиках); 13 — внешний контур ореола ороговикования; 14 — фации ороговикованных пород (П — санидинитовая и пироксен-роговиковая, А — рогово-обманково-роговиковая, М — мусковит-роговиковая); 15 — роговики и ороговиковые породы; 16 — метасоматиты; 17 — термальные образования

лосы поглощения в областях 3600–3100, 1200–850, 650–500 cm^{-1} [McKeown, 2005]. Особые отличительные параметры — два триплета: один в интервале 1200–850 cm^{-1} с наиболее ярко выраженным пиком 1000 cm^{-1} , другой — триплет в интервале 650–500 cm^{-1} , где наиболее характерный пик — 580 cm^{-1} (рис. 4, табл. 1). В табл. 2 приведены положения пиков плагиоклазов изученных образцов.

Вариации химического состава плагиоклазов на ИК-спектрах отражены в ширине и интенсивности полос поглощения (рис. 5–7). К характеристическим относятся полосы А в области частот $\nu_1 = 650\div600 \text{ cm}^{-1}$ и $\nu_2 = 550\div500 \text{ cm}^{-1}$. Здесь волновое число меняется от 649 cm^{-1} (в альбите для температуры плавления от 1100 °C) до 620 cm^{-1} (в аортите в низкотемпературной серии до 1550 °C). Индикативные пики поглощения плагиоклазов из пикритовых и тацитовых габбро-долеритов Хараэлахской интрузии находятся в диапазонах 500–650 и 850–1200 cm^{-1}

(рис. 5). Состав плагиоклазов варьирует от лабрадора (диагностируется по пикам 950, 970, 1000 cm^{-1}) до битовнит-аортита (диагностируется по пикам 1015, 1025 cm^{-1}). Диапазон индикативных значений пиков в оливиновых и оливинсодержащих габбро-долеритах смещается в областях 450–650 и 850–1200 cm^{-1} (рис. 6). Плагиоклазы имеют вариации состава в диапазоне от андезина (пики 920, 940, 980 cm^{-1}) до битовнита (1000, 1020, 1080 cm^{-1}). Индикативные пики поглощения плагиоклазов в контактовых и лейкохратовых габбро-долеритах находятся в диапазонах 500–630 и 900–1200 cm^{-1} (рис. 7). Состав плагиоклаза варьирует в пределах состава, отвечающего лабрадору (преимущественно в контактовых породах) и битовниту (в лейкохратовых разновидностях). Они диагностируются по пикам 980, 940, 1000, 980 (лабрадор), 1020, 1080 cm^{-1} (битовнит).

Как показали предыдущие исследования полевых шпатов методом ИКС [McKeown, 2005; Hecker,

Таблица 2

Значения волновых чисел пиков различных типов плагиоклазов Хараэлахской интрузии

Номер образца	Порода	Состав плагиоклаза	Полоса поглощения № 1, см ⁻¹	Полоса поглощения № 2, см ⁻¹	Полоса поглощения № 3, см ⁻¹
3Ф210-4.3.1	Габбро-долерит	андезин	3437	1013	586
3Ф210.4.3.2			3434	1010	535
3Ф 210.4.3.3		андезин	3431	970	537
3Ф210-4.3.5		андезин-лабрадор	3434	1019	574
3Ф7-431.9		битовнит	3438	1020	577
3Ф210-4.3.6			3432	1035	574
3Ф210-4.2.1			3437	1100	539
3Ф 116-3	Пикритовый габбро-долерит	анортит	3500	1020	593
3Ф211-4.2.4			3637	1024	497
3Ф210-4.2.6			3153	1015	401
3Ф210-4.4		андезин-лабрадор	3485	1010	539
3Ф210.4.5		андезин	3582	990	528
3Ф211.4.1	Оlivиновый габбро-долерит	андезин	3600	989	544
3Ф 211-4.1.2		андезин-лабрадор	3563	980	585
3Ф211-4.1.3			3598	1000	600
3Ф211-4.1.4		лабрадор	3582	1010	630
3Ф210-3.1.1	Оlivинсодержащий габбро-долерит	андезин-лабрадор	3562	1015	589
3Ф210-3.1.2		андезин-олигоклаз	3574	1000	590
3Ф210-3.1.3		битовнит-анортит	3000	1000	574
3Ф210-3.1.4		андезин-лабрадор	3062	1100	565
3Ф210-3.1.5		анортит	3031	1115	593
3Ф211-2.1.1			3534	1200	539
3Ф211.2.1.2			3438	1026	584
3Ф211-2.1.4		андезин-лабрадор	3437	1062	546
3Ф211.2.1.5		андезин	3370	1010	512
3Ф211-1.1.1		олигоклаз	3428	997	520
3Ф211-1.1.2		андезин-лабрадор	3031	1005	550
3Ф211-1.1.3	Оlivиновый габбро-долерит	лабрадор	3534	1000	537
3Ф211-1.1.4			3438	1030	580
3Ф211-1.1.6		лабрадор-битовнит	3500	1030	540
3Ф210-5.1	Контактовый габбро-долерит	лабрадор	3537	1011	530
3Ф210-5.5.1		андезин-лабрадор	3546	1009	550
3Ф210-5.3		лабрадор	3300	1000	520
3Ф210-5.4		андезин-лабрадор	3538	1000	512
3Ф210-5.5		лабрадор	3431	1008	524
3Ф 211-3.1	Лейкократовое габбро	битовнит	3582	1100	530
3Ф 211-3.2		битовнит-анортит	3562	1147	532
3Ф 211-3.3			3300	1130	574
3Ф 211-3.4			3200	1120	582
3Ф 211-3.6			3400	1011	600



Рис. 3. Химический состав плагиоклазов из различных интрузий Талнахского рудного узла по результатам классического химического анализа, по [Золотарев, Аплонов, 2014]

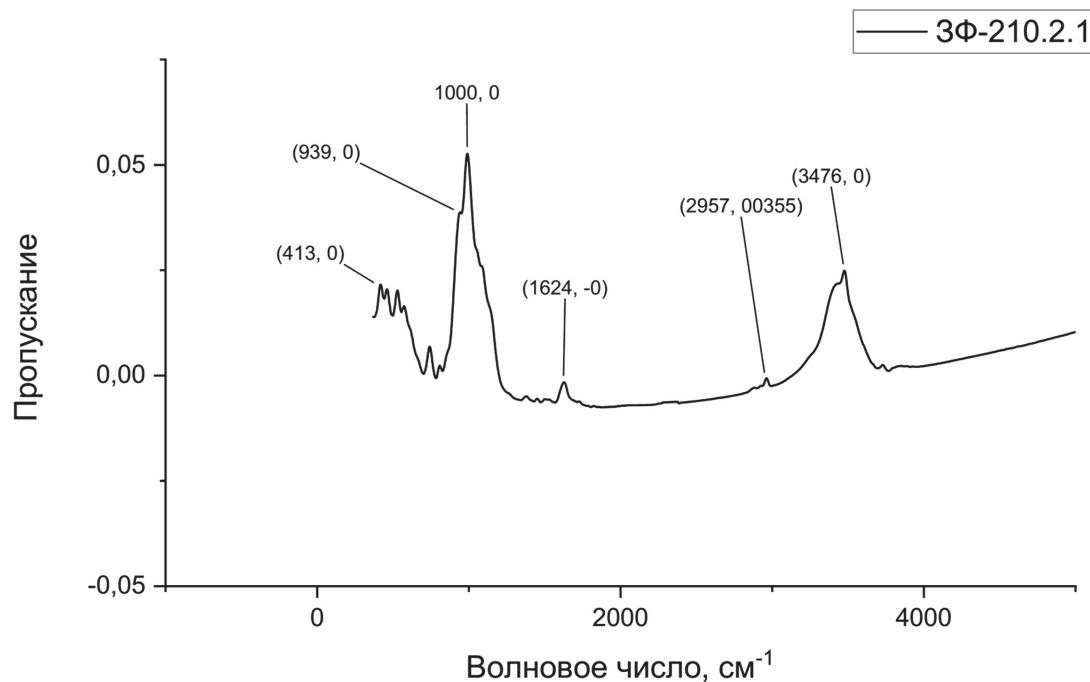


Рис. 4. Типичный спектр плагиоклаза (An^{53} , по данным МРСА) из габбро-долеритов Хараэлахской интрузии

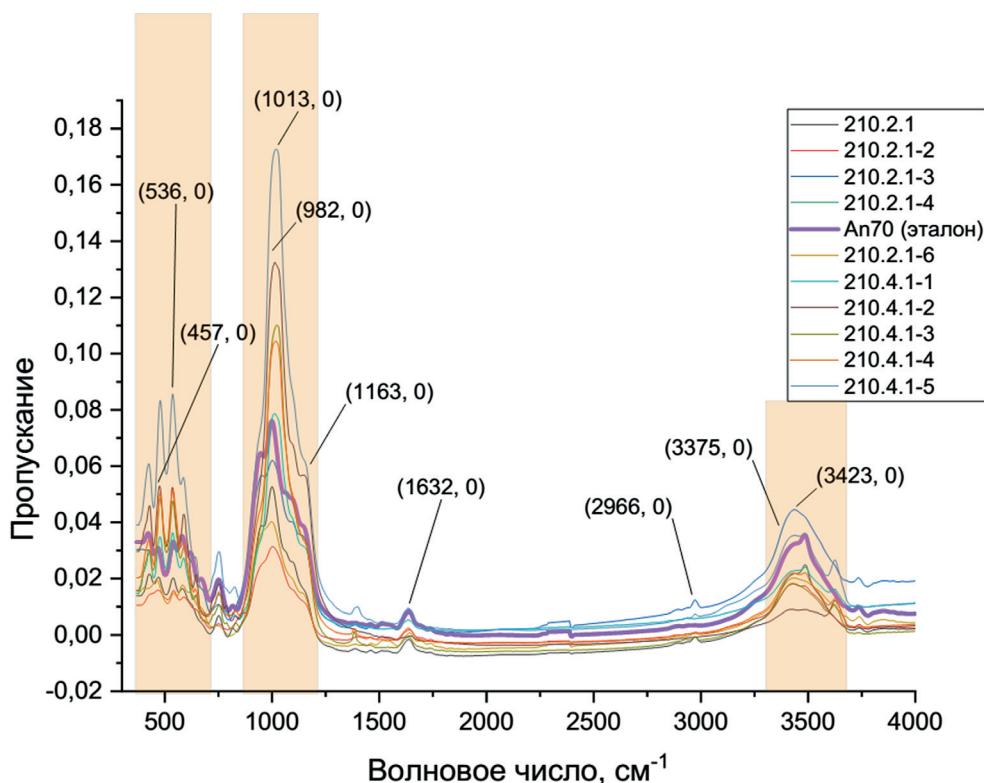


Рис. 5. Фурье ИК-спектры поглощения плагиоклазов в пикритовых и такситовых габбро-долеритах Харааляхской интрузии

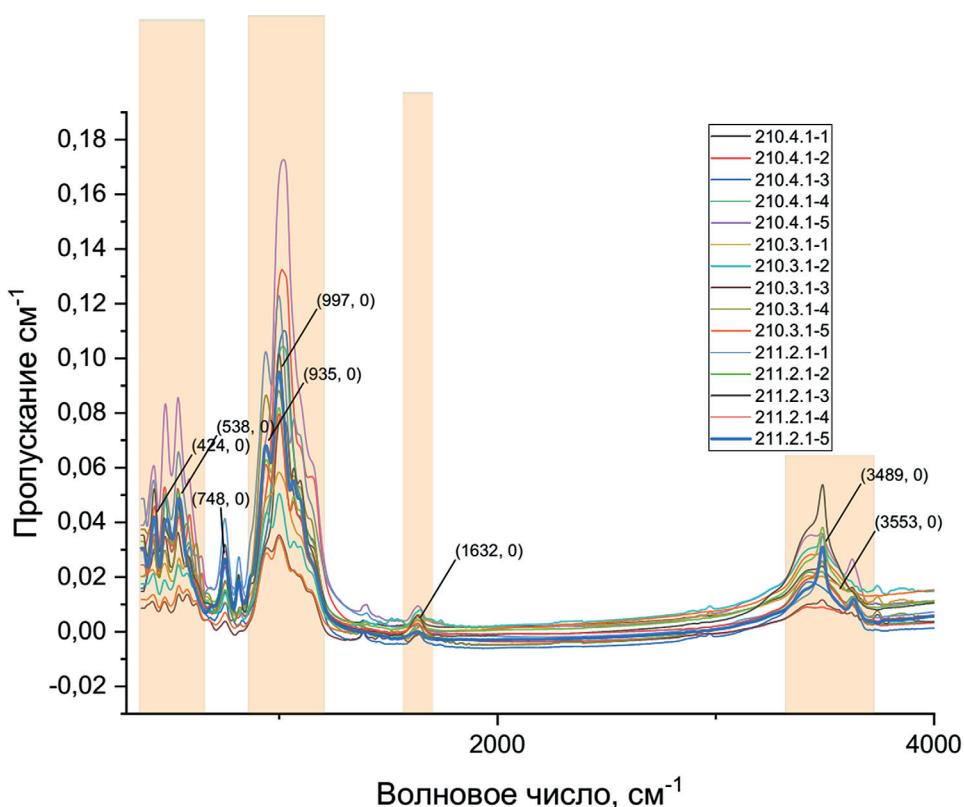


Рис. 6. Фурье ИК-спектры поглощения плагиоклазов в оливиновых и оливинсодержащих габбро-долеритах Харааляхской интрузии

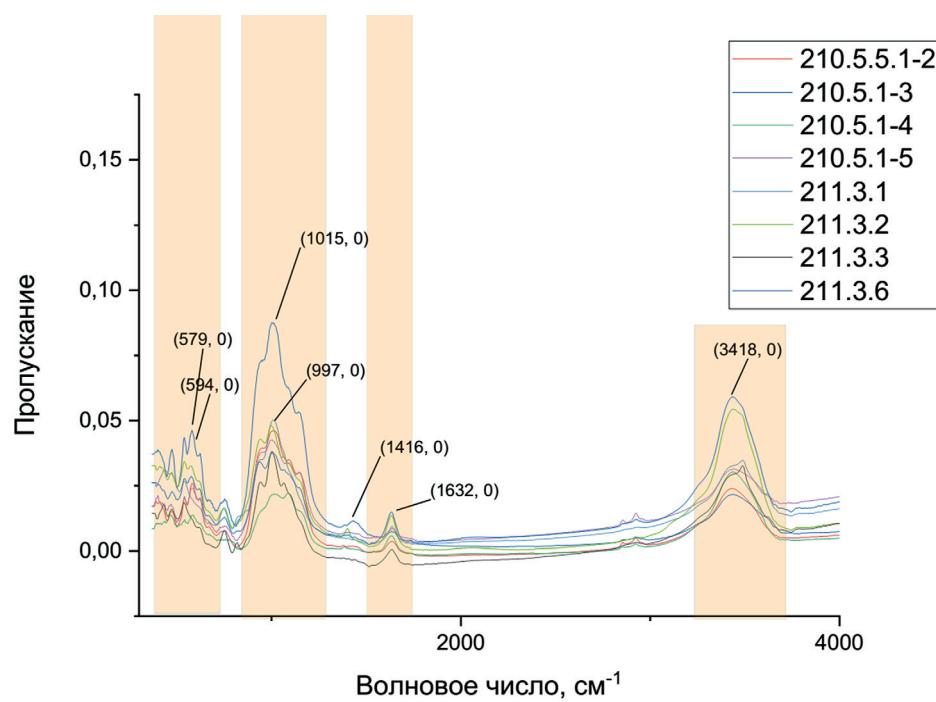


Рис. 7. Фурье ИК-спектры поглощения плагиоклазов в контактовых и лейкократовых габбро Хараэлахской интрузии

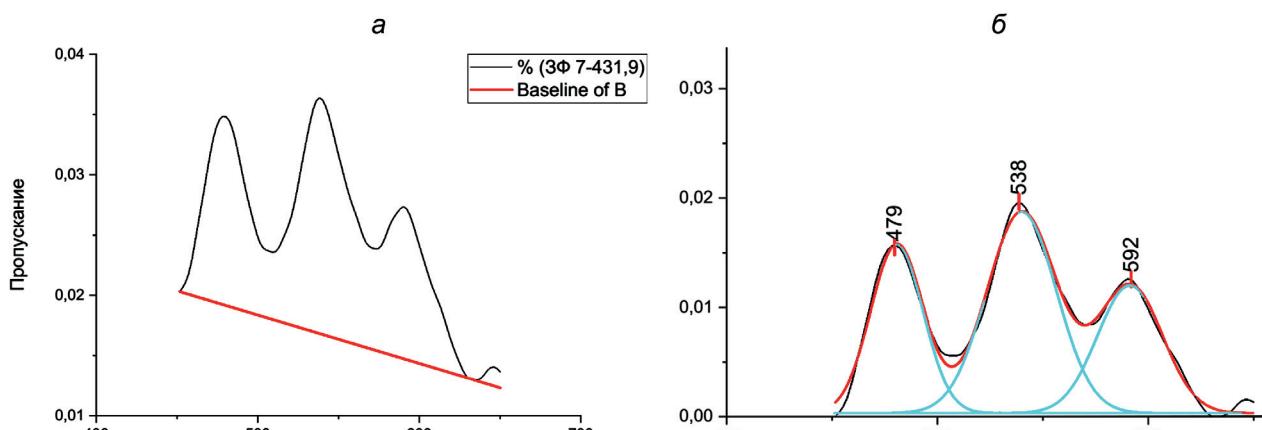


Рис. 8. Фрагмент Фурье ИК-спектров в диапазоне 1050–965 см⁻¹: а — фрагмент спектра с базовой нулевой линией; б — разложение спектра на составляющие

2010], эта группа минералов очень чувствительна к наличию элементов-примесей, что отражается на ИКС и подтверждается на изученных образцах плагиоклазов. Наличие элементов-примесей в кристаллической решетке смещает спектры в сторону спектров других веществ пропорционально их примесям. Значительно влияют на спектр также микрвключения других минералов (оливина, пироксена, магнетита) в плагиоклазе. В некоторых случаях, когда содержание примесных минералов ≥10 вес.%, спектр может стать не читаем.

Согласно данным, приведенным в работе [Смирнов, 1966], в большинстве образцов из различных дифференциатов норильских интрузий выделяются две генерации плагиоклаза: ранняя — более основная и поздняя — более кислая, что подтверждается полученными данными ИКС. В плагиоклазах из лейкократовых габбро (образцы из скважин № 3Ф7, 13Ф-13, 3Ф-210) к ранней генерации относятся плагиоклазы состава An_{50–80}. К более поздней генерации относятся плагиоклазы An_{40–50}. Систематические

исследования позволяют определить закономерность развития тех или иных типов плагиоклазов в дифференциатах Хараэлахской интрузии (табл. 2). В габбро-долеритах наблюдается ряд от олигоклаза до лабрадора, в пикритовых габбро-долеритах — преимущественно андезин и реже анортит, в габбро-долеритах с оливином до 20% андезина — лабрадора.

Почти во всех изученных разновидностях плагиоклазов присутствуют волновые числа в диапазоне 3400–3000 см⁻¹, отвечающие наличию группы OH⁻ в кристаллической решетке. Наиболее точное определение анортитового компонента в плагиоклазе осуществляется в спектрах, снятых по мономинеральным порошкам. В диапазоне 1050–965 см⁻¹ изменяется интенсивность пика в зависимости от содержания анортитового компонента. Для повышения точности (с целью полуколичественного анализа) рассчитаны площади фигур, ограниченных профилем спектра и базовой линией. Для этого фрагмент спектра в указанном интервале был проинтегрирован и приведен к нулевой линии, а затем

разложен на составляющие (рис. 8). Отдельно взятые полосы проинтегрированы и рассчитана суммарная площадь фигуры, образованной спектром и базовой линией. Увеличение площади пика поглощения прямо пропорционально увеличению аортитового компонента (табл. 3).

Таблица 3

Взаимоотношение площади фигуры под пиком и количества аортитового компонента в пластинах

Образец	Интеграл	Площадь	An
3Ф 116.2.1	9,08	0,03612	50
3Ф 210.2.2	5,507	0,02191	47
3Ф 116.2.3	11,12	0,04426	64
3Ф-116.2.4	12,39	0,04928	77
3Ф-7-431.9	14,57	0,05791	80
3Ф 116.2.6	7,561	0,03007	57
3Ф 137-1	7,37	0,02931	49

Наиболее характерны в структуре пластинах K, Fe, встречаются также В и редкоземельные элементы (REE) [Леснов, 1991]. Содержание главных и второстепенных химических элементов в пластинах определяет зависимость содержания тех или иных компонентов в сосуществующих с ними минералах. Так, содержание Ca в пластинах прямо пропорционально его количеству и количеству Mg в сосуществующем с ним клинопироксене, а содержание Fe в клинопироксене имеет отрицательную зависимость с содержанием Ca в пластинах [Золотухин, 1991]. Калий может находиться в пластинах как в виде равномерно распределенной изоморфной примеси, так и в составе самостоятельной фазы калиевого полевого шпата, образующей субмикроскопические включения, диагностируемые с помощью микрозондового анализа. Содержание K₂O в пластинах может достигать 2,5 масс.%. По данным микрозондового анализа, выполненного нами, среди пород Норильских интрузий максимальное содержание K₂O достигает 3,2 масс.% (табл. 4).

Так как ИКС весьма чувствителен к изменениям и деформациям кристаллических решеток, пики поглощения на спектрах меняют волновые числа на большую или меньшую частоту. Степень концентрации FeO в пластинах имеет одно из важнейших значений как индикатора рудоносности и варьирует от 0,35 до 1,5 масс.%. В ИК-спектрах нами диагностирован FeO в пластинах по волновым числам 3300–4000 см⁻¹ в пиках поглощения (рис. 9).

Данные микрозондовых исследований, проведенных на примере пластинах трапповых мало-глубинных интрузивов, показали, что количество примеси Fe³⁺ в пластинах имеет тенденцию к возрастанию по мере уменьшения глубины кристаллизации пород [Леснов, 1991]. В разрезе Хараэлахской интрузии по содержанию примеси Fe³⁺ выявлена вертикальная зональность: в нижних дифференциатах (пикритовые габбро-долериты) содержание Fe³⁺ в пластинах повышенено, а в верхних дифференци-

Таблица 4
Результаты исследований пластинах пород
Хараэлахской интрузии методом МРСА

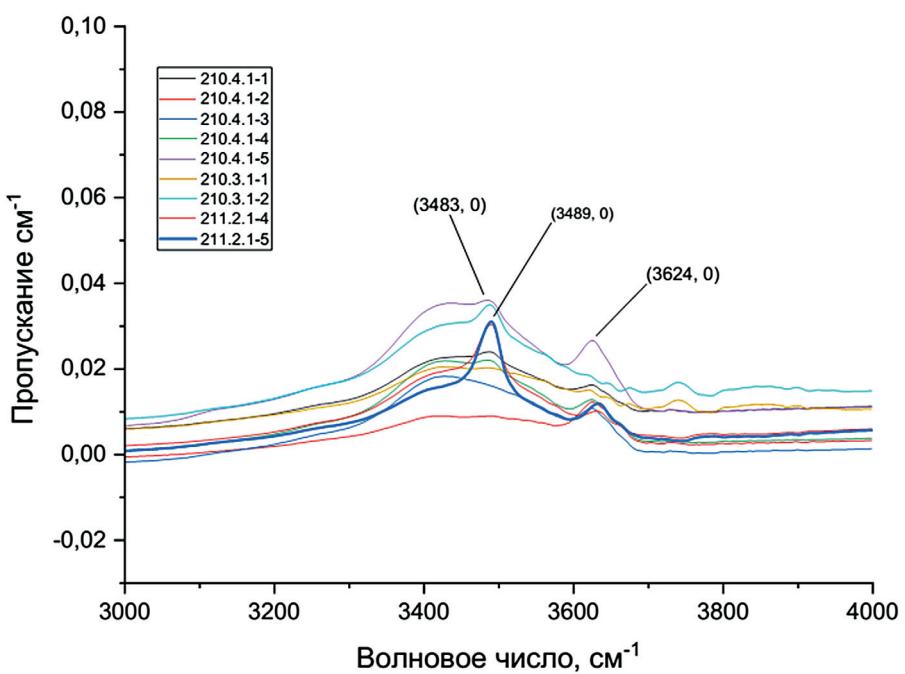
Номер образца	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
3Ф7 (1-6)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	—
	68,89	19,66	0,00	0,07	11,16	0,28	100,06
	52,49	28,97	0,70	12,94	4,26	0,21	99,57
	52,97	29,51	0,73	12,54	4,03	0,34	100,12
	52,16	28,84	0,72	12,93	4,18	0,20	99,03
	52,35	28,99	0,71	12,90	4,45	0,22	99,62
3Ф-56 (1-4)	54,52	28,01	0,59	10,64	5,59	0,64	99,99
	55,54	27,03	0,98	9,34	6,10	0,69	99,67
	54,91	26,59	0,67	10,40	6,39	0,37	99,34
	54,27	27,93	0,70	11,51	5,64	0,32	100,36
3Ф210 (1-10)	58,25	25,51	0,57	8,88	6,39	0,41	100,01
	52,06	29,36	0,66	13,36	4,21	0,14	99,78
	51,58	3,35	3,83	19,65	0,27	—	78,68
	52,11	29,09	0,87	12,95	4,65	0,14	99,81
	54,03	27,81	0,79	11,73	5,59	0,19	100,14
	52,57	29,12	0,70	12,95	4,69	0,21	100,24
	49,89	31,00	0,37	14,95	3,14	0,10	99,45
	48,14	32,04	0,41	16,20	2,59	0,07	99,44
	54,62	27,44	0,64	11,21	5,77	0,26	99,93
	55,56	27,03	0,66	10,45	6,40	0,31	100,41
3Ф-211 (1-4)	53,47	28,59	0,65	12,46	5,09	0,19	100,45
	55,62	26,95	0,61	10,57	6,37	0,28	100,40
	53,48	28,37	0,68	12,29	5,16	0,20	100,17
	48,01	32,42	0,39	16,55	2,37	0,07	99,81
3Ф-112 (1-4)	51,17	30,14	0,35	13,44	4,19	0,36	99,66
	52,19	30,05	0,35	12,60	4,21	0,37	99,77
	52,54	29,20	0,22	12,45	4,88	0,31	99,60
	51,27	30,42	0,34	13,76	3,61	0,30	99,69
3Ф-114 (1-10)	52,95	28,85	0,64	12,89	4,36	0,16	99,84
	54,00	27,92	0,73	11,71	4,98	0,21	99,55
	53,33	28,46	0,72	12,33	4,70	0,18	99,72
	52,73	29,05	0,62	13,06	4,27	0,17	99,90
	51,86	29,66	0,56	13,86	3,84	0,12	99,90
	50,05	30,48	0,48	14,87	3,25	0,09	99,22
	50,45	30,59	0,50	14,66	3,19	0,10	99,50
	47,87	32,17	0,45	16,40	2,21	0,07	99,17
	50,74	30,67	0,54	14,85	3,24	0,10	100,13
	50,95	30,79	0,51	14,83	2,45	0,11	99,63
	47,30	32,74	0,48	16,49	2,13	0,07	99,21
	48,51	32,03	0,42	16,21	2,48	0,07	99,72
3Ф-117 (1-4)	55,18	27,02	0,65	10,68	5,65	0,30	99,48
	49,77	30,60	0,44	14,98	3,24	0,11	99,12

Номер образца	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
3Ф-118 (1-8)	55,59	27,27	0,66	10,34	5,57	0,30	99,72
	50,16	29,69	0,59	15,01	3,38	0,23	99,05
	54,78	27,38	0,64	11,16	5,36	0,26	99,58
	51,57	29,92	0,57	13,40	4,14	0,14	99,73
	50,64	30,61	0,38	14,71	3,38	0,11	99,83
	50,60	30,69	0,40	14,64	3,44	0,10	99,87
	54,88	27,75	0,64	11,25	5,39	0,26	100,18
	54,75	27,64	0,62	11,09	5,45	0,25	99,81
3Ф-117 (1-6)	48,19	32,19	0,40	16,46	2,37	0,06	99,68
	47,91	32,20	0,43	16,55	2,22	0,06	99,37
	47,94	32,10	0,43	16,45	2,24	0,07	99,23
	52,70	29,13	0,57	12,90	4,30	0,29	99,89
	52,63	28,92	0,57	12,84	4,40	0,26	99,62
	52,52	29,14	0,47	13,00	4,22	0,29	99,63
3Ф137-5 (1-7)	49,81	30,62	0,64	14,41	3,59	0,14	99,21
	49,78	30,55	0,56	14,66	3,40	0,10	99,06
	52,94	28,43	0,71	11,98	4,77	0,21	99,03
	53,92	27,90	0,71	11,28	5,55	0,25	99,61
	54,33	27,30	0,68	10,88	5,54	0,28	99,01
	54,23	28,05	0,69	11,25	5,23	0,26	99,72
	52,85	28,49	0,71	11,96	4,76	0,22	99,00
3Ф137-4 (1-6)	52,68	28,33	0,79	12,03	5,07	0,20	99,09
	53,30	27,96	0,78	11,66	5,21	0,22	99,13
	48,29	31,73	0,61	15,85	2,69	0,09	99,26
	54,49	27,57	0,75	11,03	5,62	0,25	99,70
	52,97	28,11	0,75	11,82	5,17	0,21	99,04
3Ф116-4 (1-6)	50,08	30,46	0,62	14,44	3,51	0,13	99,24
	54,12	27,71	0,68	10,81	5,50	0,25	99,07
	54,30	27,44	0,71	10,79	5,53	0,24	99,02
	54,26	27,64	0,67	10,90	5,34	0,25	99,05
	54,09	27,67	0,68	10,89	5,53	0,26	99,12
	54,00	27,61	0,62	10,97	5,63	0,24	99,07
3Ф116-10 (1,2)	54,22	27,36	0,64	10,83	5,82	0,24	99,11
	50,01	30,85	0,68	14,35	3,41	0,18	99,48
3Ф116-13 (1-6)	49,34	30,92	0,76	14,61	3,27	0,16	99,06
	54,29	27,56	0,66	11,04	5,54	0,48	99,56
	54,29	27,62	0,67	11,01	5,12	0,47	99,18
	54,46	27,73	0,65	10,94	5,49	0,50	99,76
	53,14	28,07	0,74	11,83	5,04	0,43	99,25
	52,64	28,41	0,79	11,92	5,03	0,33	99,12
	53,81	28,73	0,77	11,81	4,72	0,35	100,19

Окончание табл. 4

Номер образца	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
3Ф116-12	55,73	27,20	0,53	9,83	5,83	0,39	99,51
	55,18	27,27	0,53	10,23	5,54	0,34	99,09
	55,31	27,16	0,58	9,80	5,97	0,40	99,23
	55,32	27,12	0,57	9,86	6,27	0,40	99,54
	54,64	27,45	0,53	10,25	5,80	0,37	99,03
3Ф116-2	47,45	32,45	0,63	16,42	2,37	0,07	99,37
	48,19	31,60	0,69	15,57	2,91	0,09	99,04
	53,06	29,08	0,66	12,16	4,49	0,20	99,66
	52,86	28,73	0,69	11,87	4,91	0,20	99,27
3Ф116-15	51,47	29,44	0,78	12,97	4,44	0,23	99,32
	51,38	29,31	0,79	12,88	4,43	0,23	99,02
	49,50	30,87	0,85	14,60	3,44	0,15	99,40
	50,71	30,29	0,85	13,85	3,87	0,18	99,75
	50,39	30,17	0,56	13,95	3,76	0,23	99,07
3Ф116-8	54,19	27,43	0,66	10,48	5,99	0,34	99,08
	61,00	24,08	0,32	5,92	8,72	0,65	100,67
	60,02	24,71	0,34	6,74	8,17	0,55	100,53
	59,69	24,72	0,37	6,84	7,78	0,53	99,92
-	68,53	19,65	0,01	0,01	11,51	0,02	99,71
3Ф137-2	49,22	31,54	0,80	14,98	3,08	0,12	99,74
	48,87	31,46	0,64	14,87	3,15	0,12	99,11
	51,27	30,52	0,66	13,48	3,99	0,13	100,05
	51,25	29,88	0,75	13,23	4,15	0,15	99,40
3Ф137-3	55,00	27,68	0,61	10,39	5,63	0,26	99,57
	54,67	27,59	0,66	10,63	5,59	0,24	99,37
	56,23	27,61	0,62	10,20	5,67	0,26	100,58
	55,74	27,50	0,64	10,38	5,59	0,26	100,10
	55,41	27,69	0,66	10,63	5,43	0,25	100,06
3Ф116-6	48,29	32,32	0,51	15,57	2,47	0,11	99,27
	48,15	32,62	0,56	16,13	2,26	0,11	99,82
3Ф116-9	46,63	33,59	0,52	17,25	1,76	0,08	99,83
	47,09	33,28	0,52	16,89	1,91	0,08	99,77
	47,17	33,15	0,53	16,87	2,03	0,10	99,84
	47,27	33,07	0,54	16,70	2,05	0,09	99,71
	50,27	30,61	0,60	14,09	3,57	0,18	99,32
	46,86	33,24	0,43	17,10	1,80	0,09	99,51
3Ф116-11	49,72	30,77	0,74	14,45	3,35	0,17	99,19
	49,41	30,85	0,94	14,92	3,21	0,23	99,56
	50,32	31,00	0,74	14,44	3,32	0,16	99,98
3Ф116-5	47,10	33,08	0,77	16,68	2,01	0,06	99,71
	47,06	32,81	0,75	16,55	2,20	0,07	99,44
	47,61	32,60	0,66	16,33	2,19	0,10	99,49
	47,87	33,18	0,74	16,59	2,03	0,07	100,50

Рис. 9. Фрагмент ИК-спектров в диапазоне 3000–4000 см⁻¹. Изменение положения пика в зависимости от содержания FeO



атах (лейкократовые габбро и оливинсодержащие габбро-долериты) понижено (рис. 10).

Достаточно чуткими индикаторами кристаллизационной дифференциации считаются отношения (Ca+Na+K)/Al и Si/Al, нормирующие состав плагиоклазов по алюминию [Рябов, 1984]. По данным [McKeown, 2005; Hecker, 2010; Theodosoglou, 2010], в минералах группы полевых шпатов изменения Al отражаются на изменении полос поглощения в интервале 400–650 см⁻¹. По Фурье ИК-спектрам выявлены изменения отношения Al к (K+Ca). Отмечена прямая корреляция между этим соотношением и изменением профиля спектра плагиоклазов в диапазоне 450–600 см⁻¹.

В зависимости от содержания аортитового компонента этот фрагмент спектра будет представлен либо как симметричный триплет с ярко выраженным пиком 575 см⁻¹ (рис. 11, образец № 210.4.1-1), либо как триплет, где увеличивается интенсивность каждого последующего пика (рис. 11, образец № 210.4.1-5). Каждый спектр в этом фрагменте был разложен и проинтегрирован. Отношение алюминия к сумме калия и кальция увеличивается с увеличением площади фигуры, ограниченной профилем и базовой нулевой линией (табл. 5).

Таблица 5

Зависимость отношения Al/(K+Ca) от площади фигуры под пиками в интервале 400–650 см⁻¹

Образец	Интеграл	Площадь	Al/K+Ca
210.4.1-1	7,08	0,03452	1,94
210.4.1-4	8,507	0,02382	1,95
210.4.1-5	11,03	0,04540	2,14
211.2.1-4	14,80	0,04814	2,41
211.2.1-5	16,55	0,05791	2,76

Заключение. В лейкократовых дифференциатах Хараелахской интрузии плагиоклаз содержится в количестве до 80% от объема породы; в оливинсодержащих и оливиновых габбро-долеритах оно составляет 45–60% от объема породы.

Пики ИК-спектров плагиоклазов варьируют как по горизонтали (изменение волновых чисел), так и по вертикали (интенсивность). При сопоставлении Фурье ИК-спектров и данных, выполненных по тем же образцам микрорентгеноспектральных исследований, удалось выявить корреляцию формы спектра с составом плагиоклаза. Увеличение площади фигуры, образованной ИК-спектром и базовой нулевой линией, прямо пропорционально увеличению аортитового компонента. Наиболее точный результат дает ИК-спектр, снятый в порошке. Плагиоклазы с большим количеством аортитовой составляющей имеют смещение спектров в сторону диапазона 1050–965 см⁻¹. На смещение графиков спектров также влияют вариации содержания примесей. Некоторые из них, например сера, могут сильно искажать спектральную картину, поэтому для сохранения возможности анализировать ИК-спектры необходимы образцы зерен, содержащих ее в количестве не более 0,5 вес.%.

Результатами Фурье ИК-спектроскопии подтверждены исследования плагиоклазов методом микрорентгеноспектрального анализа, проведенные ранее группой исследователей [Рябов, 1974; Рябов, 1984; Золотарев, Аплонов, 2014; Золотухин и др., 1975]. Изученное распределение элементов-примесей в плагиоклазах указывает на определенный геохимический признак условий образования рудно-носных интрузивов и рудообразования. Наибольшее индикативное значение имеет изоморфная примесь Fe. Концентрация Fe в плагиоклазах габбро-долеритов составляет в среднем 0,67 масс.%. Макси-

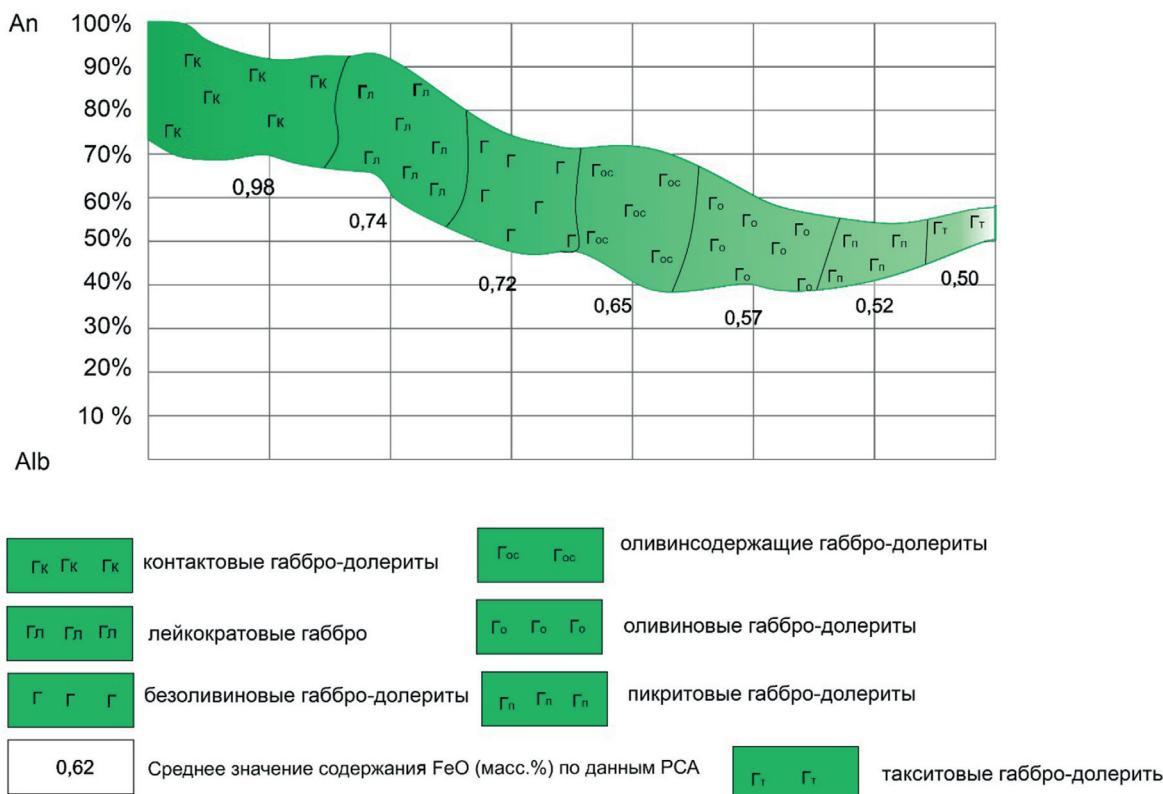
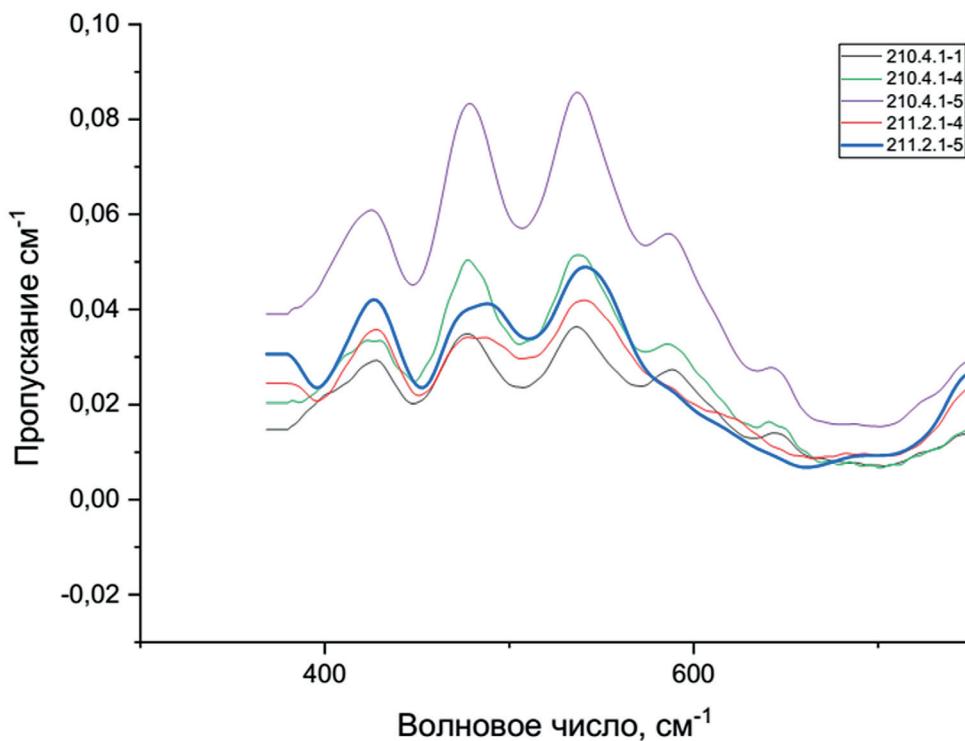


Рис. 10. Вариации химического состава плагиоклазов в различных породах интрузий норильского типа

Рис. 11. Фрагменты ИК-спектров плагиоклазов и в диапазоне 400–650 cm^{-1}



мальные значения концентрации Fe в плагиоклазе выявлены в образцах плагиоклазов из пикритовых габбро-долеритов — до 1,5 масс.% (скважина 3Ф-210, глубина 1411 м). В образцах пород с более верхних горизонтов содержание примеси Fe уменьшается (0,52 масс.% и ниже). Нижние дифференциаты (пи-

кристовые габбро-долериты) характеризуются плагиоклазами с повышенными значениями содержания изоморфной примеси Fe в плагиоклазах, а верхние дифференциаты (лейкохратовые габбро и оливинсодержащие габбро-долериты) — пониженными. Наибольшее содержание Fe в виде изоморфной примеси

в плагиоклазе выявлено в плагиоклазах пикритовых габбро-долеритов, по контуру распространения которых определяется морфология рудных тел. Таким образом, подтверждаются данные предыдущих исследований [Леснов, 1991; Наторхин и др., 1975]. Повышенная концентрация Fe в этих дифференциатах придает ему индикативное значение на оруденение.

Изучение химического состава и характера распределения примесей в породообразующих минералах методом ИК-спектроскопии позволяет осущест-

влять разделение минеральных разновидностей без изучения физических и структурных особенностей в каждом из отобранных образцов и, таким образом, выявить их индикативные особенности, необходимые при прогнозировании оруденения и изучении закономерностей его размещения.

Совокупность данных можно использовать для выявления закономерностей формирования минеральных ассоциаций в геологических объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анастасенко Г.Ф.* Распределение бора в породах и минералах трапповой формации северо-запада Сибирской платформы // Геохимия. 1973. № 10. С. 1481–1489.
- Белянкин Д.С.* О научных предрассудках и о железе в полевых шпатах // Белянкин Д.С. Избр. тр. Т. 2. М.: Изд. АН СССР. 1958. С. 57–59.
- Геология Норильской металлогенической провинции / Под ред. И.И. Никулина. М.: МАКС Пресс, 2020. 524 с.
- Годлевский М.Н.* Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолиздат, 1959. 89 с.
- Додин Д.А., Батуев Б.Н.* Геология и петрология Талнахских дифференцированных интрузий и их метаморфического ореола // Петрология и рудоносность Талнахской и Норильской дифференцированных интрузий. Л.: Недра, 1971 (Тр. НИИГА. т. 167).
- Золотарев А.А., Аплонов В.С.* Особенности химического состава плагиоклазов в горных породах Талнахского рудного узла (северо-запад Сибирской платформы) // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2014. Вып. 3. С. 25–30.
- Золотухин В.В., Виленский А.М., Дюжиков О.А.* Базальты Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1986. 245 с.
- Золотухин В.В., Рябов В.В., Васильев Ю.Р., Шатков В.А.* Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии. Новосибирск: Наука, 1975. 320 с.
- Иванов М.К., Иванова Т.К., Шатков В.А.* и др. Структурно-формационные и физико-химические условия формирования месторождений Норильского плато в связи с поисками богатых руд. СПб.: Фонды ВНИИОкеангеология, 1973.
- Леснов Ф.П.* Плагиоклазы полигенных базит-гипербазитовых plutонов. Новосибирск: Наука, 1991. 110 с.
- Люлько В.А., Нестеровский В.С., Говордовская Т.Г.* Магматогенные брекчи никеленосных трапповых интрузий // Медно-никелевые руды Талнахского рудного узла. Л., 1972. С. 123–127.
- Наторхин И.А., Архипова А.И., Батуев Б.Н.* Петрология Талнахских интрузий. Л.: Недра, 1977. 236 с.
- Радько В.А.* Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 226 с.
- Рябов В.В.* Плагиоклазы и клинопироксены расслоненных трапповых интрузий, как индикаторы дифференциации магматического расплава // Докл. АН СССР. 1974. Т. 219, № 1. С. 197.
- Рябов В.В.* О составе верхних контактовых зон норильских интрузий, несущих богатую хромитовую минерализацию // Критерии рудоносности магматических комплексов. Новосибирск: ИГиГ, 1984. С. 124–142.
- Рябов В.В., Золотухин В.В.* Минералы дифференцированных траппов. Т. 1. Новосибирск: Нонпарель, 1999. 408 с.
- Рябов В.В., Шевко А.Я., Гора М.П.* Магматические образования Норильского района // Петрология траппов. Т. 1. Новосибирск: Нонпарель, 2001. 408 с.
- Смирнов М.Ф.* Строение норильских никеленосных интрузий и генетические типы их сульфидных руд. М.: Недра, 1966.
- Соболев А.В., Криволуцкая Н.А., Кузьмин Д.В.* Петрология родонаучальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции // Петрология. 2009. Т. 17, № 3. С. 276–310.
- Топоминералогическое картирование интрузий Норильского района по данным инфракрасной спектроскопии: Метод. пособие / Под общ. ред. В.И. Старостина. М.: ВНИИ- геосистем, 2020. 108 с.
- Corlett M., Ribbe P.H.* Electron probe microanalysis of minor elements in plagioclase feldspars // Schweiz. Miner. Und Petrogr. Mitt. 1967. Bd 47, H1. S. 333–350.
- Hecker C., Meidje M., Meer F.D.* Thermal infrared spectroscopy on feldspars — Successes, limitations and their implications for remote sensing // Earth. Sci. Rev. 2010. Vol. 103. P. 60–70.
- Matteson A., Herron M.* End-member feldspar concentrations determined by FTIR Spectral analysis // J. Sediment. Petrol. 1993. Vol. 63, № 6. P. 1144–1148.
- McKeown D.A.* Raman spectroscopy and vibrational analyses of albite: From 25 °C through the melting temperature // Amer. Mineral. 2005. Vol. 90. P. 1506–1517.
- Theodosoglou E., Koroneos A., Soldatos T.* et al. Infrared and X-Ray powder diffraction analysis of naturally occurred k-feldspars // Bull. Geol. Soc. of Greece. 2010. Vol. XLIII, N 5. P. 2752.

Статья поступила в редакцию 20.10.2021; одобрена после рецензирования 26.10.2021; принята к публикации 28.04.2022.